

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Институт Физико-технический  
Направление подготовки «Ядерные физика и технологии»  
Кафедра Техническая физика

**БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА**

Тема работы
Разделение ионов кальция и магния в водных растворах хлоридов под действием внешнего ассиметричного электромагнитного поля

УДК 537.21:544.35

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0A2Д	Туксов Илья Владимирович		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. ТФ ФТИ	Тимченко С.Н.	К.т.н.		

**КОНСУЛЬТАНТЫ:**

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. Менеджмент ИСГТ	Сечина А.А.	К.х.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент каф. ПФ ФТИ	Гоголева Т.С.	к.ф-м.н.		

**ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор каф. ТФ ФТИ	Шаманин И.В.	д.ф-м.н, профессор		

Томск – 2016г.

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И  
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

Группа	ФИО
0А2Д	Туксов Илья Владимирович

Институт	ФТ	Кафедра	ТФ
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	14.03.02 Ядерные физика и технологии

**Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:**

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Работа с информацией, представленной в российских и иностранных научных публикациях, аналитических материалах, статистических бюллетенях и изданиях, нормативно-правовых документах
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Оценочная карта конкурентных технических решений
2. Планирование и формирование бюджета научных исследований	Иерархическая структура работ SWOT-анализ Календарный план-график реализации проекта
3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	Определение ресурсоэффективности проекта

**Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):**

1. Оценочная карта конкурентных технических решений
2. Матрица SWOT
3. Календарный план проекта
4. Линейный план-график проекта

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. МЕН ИСГТ	Сечина А.А.	к.х.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А2Д	Туксов Илья Владимирович		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
0А2Д	Туксов Илья Владимирович

Институт	ФТ	Кафедра	ТФ
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	14.03.02 Ядерные физика и технологии

### Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Описание рабочего места (рабочей зоны) на предмет возникновения:	<ul style="list-style-type: none"> <li>– вредных факторов производственной среды: повышенный уровень электромагнитных полей, отклонение показателей микроклимата от оптимальных, ионизирующее излучение от ПЭВМ;</li> <li>– опасных факторов производственной среды: вероятность возникновения пожара, вероятность поражения электрическим током.</li> </ul>
2. Знакомство и отбор законодательных и нормативных документов по теме:	<ul style="list-style-type: none"> <li>– электробезопасность;</li> <li>– пожарная безопасность;</li> <li>– требование охраны труда при работе с ПЭВМ.</li> </ul>

### Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Анализ выявленных вредных факторов проектируемой производственной среды в следующей последовательности:	<ul style="list-style-type: none"> <li>– действие фактора на организм человека;</li> <li>– приведение допустимых норм с необходимой размерностью (с ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ);</li> <li>– предлагаемые средства защиты (коллективные и индивидуальные).</li> </ul>
2. Анализ выявленных опасных факторов проектируемой произведённой среды в следующей последовательности:	<ul style="list-style-type: none"> <li>– электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, средства защиты);</li> <li>– пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения).</li> </ul>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент каф. ПФ ФТИ	Гоголева Т.С.	к.ф.-м.н.		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А2Д	Туксов Илья Владимирович		

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Институт ФТИ  
Направление подготовки «Ядерная физика и технологии»  
Кафедра Техническая физика

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. кафедрой

\_\_\_\_\_ «\_\_\_» И.В. Шаманин

**ЗАДАНИЕ**

**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

бакалаврской работы
---------------------

Студенту:

Группа	ФИО
0A2Д	Туксов Илья Владимирович

Тема работы:

Разделение ионов кальция и магния в водных растворах хлоридов под действием внешнего асимметричного электромагнитного поля	
Утверждена директором ФТИ	№538/с от 29.01.2016

Срок сдачи студентом выполненной работы:	29.06.2016г.
--	--------------

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b>	Исследование процессов электроиндуцированного переноса сольватированных ионов в растворе хлоридов под действием асимметричного электрического поля.
<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	При разработке бакалаврской работы должны быть рассмотрены следующие вопросы: 1. Разработка . экспериментальной установки 2. Экспериментальное изучение процесса электроиндуцированного переноса сольватированны ионов кальция и магния в растворах электролитов 3. Исследование частотной зависимости эффекта разделения ионов кальция и магния 4. Экономическое обоснование проведения НИР. Выводы по работе. Заключение
<b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>	
<b>Раздел</b>	<b>Консультант</b>
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Доцент кафедры «Менеджмент» Сечина А.А.
Социальная ответственность	Ассистент кафедры «Прикладная физика» Т.С. Гоголева

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	14.05.2016г.
---	--------------

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент каф. ТФ ФТИ	Тимченко С.Н.	к.т.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0А2Д	Туксов И.В.		

## Содержание

Реферат .....	7
Определения.....	8
Введение .....	9
1 Электрофизические и электрохимические методы в элементном и изотопном разделении.....	12
1.1 Электродиализ .....	12
1.2 Метод ионных подвижностей .....	16
1.3 Обратный осмос .....	17
1.4 Дистилляция .....	19
1.5 Ректификация .....	22
2. Практическая часть.....	24
2.1 Модель эффекта.....	24
2.2 Описание установки.....	30
2.3 Описание Эксперимента.....	32
2.4 Результаты анализа эксперимента .....	35
Выводы .....	42
Заключение.....	43
Список Литературы .....	44
Приложение А.....	45
Приложение Б .....	46

## Реферат

Выпускная квалификационная работа: 82 страницы, 12 рисунков, 9 таблиц, 20 источников, 3 приложения.

Ключевые слова: дрейф, селективный ион, аквакомплекс, коэффициент разделения, очистка, раствор.

Объектом данной работы является процесс селективного дрейфа сольватированных катионов кальция и магния в ассиметричном электрическом поле.

Цель работы – изучение явления селективного дрейфа катионов кальция и магния, сборка экспериментальной установки и получение результатов, свидетельствующих о наличии данного явления.

В процессе работы были проведены опыты, с разработанной установкой и произведена статистическая обработка полученных результатов эксперимента.

В результате исследований было получено экспериментальное подтверждение эффекта разделения, при воздействии на раствор кальция и магния ассиметричных электромагнитных полей.

Область применения данного метода могут быть различны. Например, очистка воды для атомных электростанций, переработка радиоактивных отходов, получение особо чистых веществ в медицине и так далее.

В дальнейшем планируется продолжить изучение данного явления уже на других веществах (стронций) и использование другого вида установки, для того, чтобы сравнить результаты и определить более эффективную сборку.

## **Определения**

**Аквакомплекс** — вид комплексных химических соединений, содержащих в качестве лигандов (ион, атом или молекула, связанная с неким центром) одну или несколько молекул воды

**Дрейф** — относительно медленное направленное перемещение частиц под действием различных причин, налагающееся на их основное движение

**Сольватированный ион** — Ион, захваченный средой в результате поляризации окружающих молекул

**Ассиметричный потенциал** — Потенциал, в котором абсолютные значения амплитуд полупериодов отличаются

**Коэффициент разделения** — Характеризует величину эффекта разделения в обогащенной и обедненной фракции по отношению к концентрации в потоке питания

**Раствор** — Однородная смесь, переменного, или гетерогенного, состава, состоящая из двух или более компонентов



## **Введение**

В современном мире существует высокая потребность в получении особо чистых и моноизотопных органических, и неорганических веществ, которые в дальнейшем будут использоваться в современной технике, таких как: атомная промышленность, квантовая электроника, полупроводниковая техника и прочее. Ответом на многие задачи, являющиеся в приоритете, таких как непосредственное превращение тепловой энергии в электрическую, создание термически, химически и механически устойчивых материалов, непосредственно связаны с проблемой получения особо чистых и моноизотопных веществ. Несмотря на то, что в мире используется огромное количество методов, способных получать особо чистые вещества, все они требуют большое количество энергии.

Так же, нельзя забывать о таком важном и очень волнующим вопросе, как очистка и переработка радиоактивных отходов. Этот вопрос уже долгие годы остается открытым, ведь его решение не является простым. К самому понятию «радиоактивные отходы» относятся вещества, которые не могут быть использованы в дальнейшей работе, так как в них содержится большое количество радионуклидов, которые превышают определенные нормы. Особенность заключается в том, что любые физико-химические и химические способы обработки не позволяют обеспечить биологическую безопасность этих веществ.

Изучение процессов массопереноса в водных растворах солей, редкоземельных металлов, щелочноземельных металлов, при индуцирования внешними воздействиями, может составить основу, для поиска новых способов очистки и обогащения. Однако, получить эти элементы не так просто, ввиду их большой стоимости и необходимости в других сферах.

Действие электрического и магнитного полей, а также электромагнитных волн на вещество является предметом фундаментальных и прикладных исследований на протяжении всей истории человечества. Предположение о том, что внешнее поле не изменяет свойств вещества, означает, что

действующие внутри вещества микрополя считаются очень большими по сравнению с внешним полем и влияние этого поля на вещество мало. При этом существуют эффекты, указывающие на то, что одновременное действие двух полей на вещество приводит к результату, не совпадающему с результатом независимого действия каждого из этих полей на вещество.

Раствор является смесью как минимум двух веществ. Важным моментом является то, что действие одного и того же поля на эти вещества в отдельности может не вызывать никаких изменений их свойств, а действие того же поля на смесь этих веществ приводит к необратимым изменениям. Для описания этого используется привычный аппарат физики, составляющий основу электрохимии, например.

Большинство приложений различных физических явлений и процессов в науке, технике и технологиях базируется на том, что при каком-либо инициирующем действии происходит цепь последовательных событий, приводящих в итоге к требуемому результату. В такой цепи событий обязательно присутствует звено, в котором задействовано вещество как таковое в том или ином физическом состоянии и агрегатной форме. Вещество может быть просто посредником. В этом случае, выполнив свою функцию, оно останется тем же веществом. Простой пример этому – вещество проводника, по которому проходит ток, не вызывающий его значительного разогрева. В другом случае вещество, выполняя свою функцию, претерпевает качественные изменения. Тот же самое вещество проводника, по которому проходит значительный ток, может за несколько микросекунд перейти в плазменное состояние. Это так называемый электрический взрыв проводников. Выполнить функцию проводника направленного движения электронов в ограниченном объеме в первом случае вещество может многократно, а во втором – только один раз. С точки зрения техники и технологий удобно, чтобы вещество свою функцию выполняло многократно, сохраняя при этом свои свойства перед очередным действием.

И так, в силу всех этих моментов можно сказать, что актуальность этой работы заключается в том, чтобы попробовать отыскать такой способ очистки веществ, который будет более эффективным, по сравнению с уже существующими методами, который будет прост в использовании и сборке очистительной установки.

Целью данной работы является исследование процессов электроиндуцированного переноса сольватированных ионов в растворе под действием ассиметричного электрического поля.

Опираясь на выше сказанное, можно выделить следующие задачи, которые необходимо выполнить:

1. Разработка конструкции экспериментальной установки.
2. Экспериментальное изучение процесса электроиндуцированного переноса сольватированных ионов кальция и магния в растворах электролитов.
3. Исследование частотной зависимости эффекта разделения ионов кальция и магния.
4. Составление выводов по проделанной работе

## **1 Электрофизические и электрохимические методы в элементном и изотопном разделении**

Компоненты, находящиеся в растворе, могут быть в различных формах: в виде ассоциатов полимерных и простых нейтральных молекул, в виде ионов, коллоидных и мелкодисперсных частиц и т.п.. Опираясь на это, можно сказать, что поведение компонентов системы в электрическом поле не является равным и зависит не только от физико-химических свойств растворителя и природы вещества, но и от характера электродных процессов — окислительно-восстановительных реакций, адсорбционных явлений, перенапряжения и пр.. Не мало важным моментом является тот факт, что не все явления, которые найдены при пропускании электрического тока через раствор, достаточно изучены для использования их в методах глубокой очистки неорганических веществ. Очень важным и практичным в исполнении, является процесс электропереноса в жидких металлах. Было найдено, что в разбавленных амальгамах, примеси K, Na, Rb, Cs и Bi, мигрируют при электропереносе к аноду, тем самым обладая отрицательным эффективным зарядом, примеси же Ag, Ga, Mg, Zn, Pb мигрируют к катоду. Однако, примеси Ag (0,4 ат.%) и Pb (0,6 ат.%) при температуре около 100 °С, в жидком калии, мигрируют к аноду. Можно сказать, что явление электропереноса связан с возрастанием интерметаллических соединений примесей потоков электронов.

### **1.1 Электродиализ**

Изначально, электродиализ предложили, как способ очистки веществ. Идею выдвинули Сабатес и Мейграт в 1890 году и с тех пор данный способ часто используется для удаления примесей из растворов коллоидов и суспензий малорастворимых веществ, удаление из растворов неэлектролитов.

Сам электродиализ является достаточно сложным физико-химическим процессом, который протекает в электролитической ячейке, которая разделена полупроницаемыми мембранами (диафрагмами). Наличие мембран способствует появлению не только новых процессов, таких как электроосмос и диализ, но и приводит к тому, что меняется число переноса ионов в порах

мембран, если сравнивать со свободным объемом раствора, и начинает возникать своеобразный эффект сортировки. Несмотря на это, базой электродиализного процесса остается электролиз, важность которого повышается с уменьшением концентрации примесей электролитов.

Само наличие ионитвых мембран позволяет расширить область применения электродиализного метода, а именно, как метода по очистке веществ. Благодаря этому, появляется возможность убрать микропримеси из электролитов. А именно, те электролиты, в которых содержится большие ионы (такие как, соли больших неорганических и органических катионов и анионов, растворимые и нерастворимые полиэлектролиты), практически не способны преодолеть ионитовую мембраны и являются «неспособными к электродиализу» поэтому легко очищаются от микропримесей обычных электролитов.

Самой простой конструкцией электродиализного аппарата является электролитическая ячейка с биполярной мембранной (рисунок 1.1). Такие двухкамерные электродиализаторы, которые собирают в каскад, можно могут осуществлять очистку водных растворов солей двух- и трехвалентных металлов от микропримесей щелочных металлов.

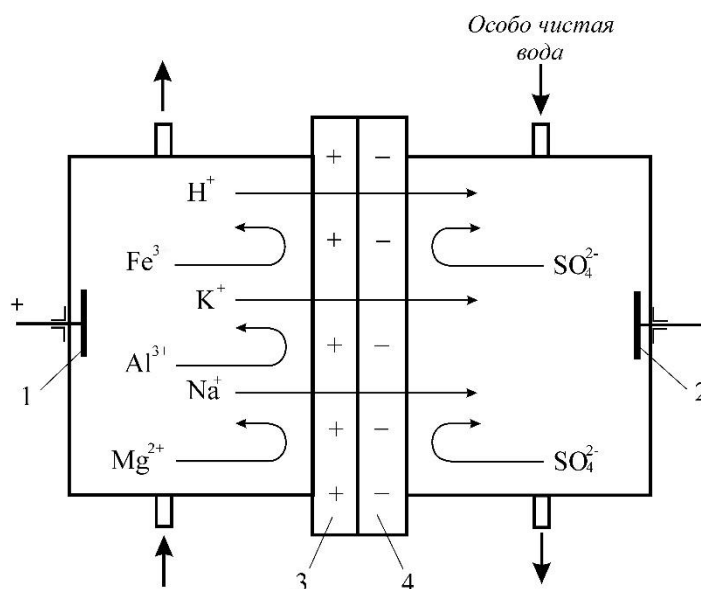


Рисунок 1.1 - Двухкамерный электродиализатор с биполярной мембраной  
1-анод; 2-катод; 3-анионитовая часть биполярной мембраны; 4- катионитовая часть биполярной мембраны

Сами электроды установок изготавливаются только из особо чистого графита или платины. Несмотря на это, вероятность загрязнения растворов продуктами электрохимической коррозии электродов никуда не пропадает. Эффективность самого процесса, зачастую, определяется тем, какие мембраны используются в установке.

На самих диафрагмах, в процессе электродиализа, накапливается большое количество загрязнений ( $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{SiO}_3$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ,  $\text{Al}(\text{OH})_3$ ,  $\text{BaSO}_4$  и другие) в виду чего, около диафрагм появляется градиента pH, различных реакций удаляемых ионов с противоионами мембран, присутствия в средней камере или в исходном неэлектролите коллоидных загрязнений и т.д.. Как правило, в большинстве случаев «отравляют» катионитовую мембрану ионы  $\text{Pb}^{2+}$  и  $\text{Fe}^{3+}$ . Как только на мембранах появляются налеты это приводит к снижению выхода по току и повышению сопротивления электродиализатора. Для того, чтобы убрать налет с мембран используют смену полярности электродов и направления потоков рабочих растворов, и промывающей воды. Именно поэтому, электроды должны быть стойкими, к любому виду активности (химической, термической, механической и пр.) продуктов, которые появляются как на катоде, так и на аноде. Обычная десорбция примесей Pb, Fe,

Cd и других с мембран без перемены полярности возможна только при длительном электролизе раствором высокой кислотности.

Процесс электродиализа в меньшей степени используется в промышленности, чем процессы обратного осмоса и ультрафильтрации. Это объясняется тем, что при помощи электродиализа из раствора можно удалять только ионы. Наиболее широко процесс электродиализа применяется для опреснения солоноватых вод с целью получения питьевой или технической воды. Существуют и электродиализные установки для получения питьевой воды из морской. Однако чаще этот процесс используют для обработки воды, содержание растворенных солей в которой составляет примерно 10 000 мг/л. В этом случае процесс электродиализа является более экономичным по сравнению с обратным осмосом или выпариванием. При помощи электродиализа можно получать растворы солей со сравнительно высокой концентрацией. Благодаря этой особенности рассматриваемого процесса электродиализ применяется также при производстве поваренной соли и других солей из морской воды. Электродиализ применяется также для предварительной очистки воды для теплоэнергетических установок. Другое важное направление использования электродиализа – обработка сточных вод. Электродиализ применяется для деминерализации сточных вод гальванических и травильных производств, производства аммиачной селитры, для очистки радиоактивных сточных вод. Этот процесс используется для концентрирования сточных вод, содержащих ценные компоненты (например, редкие и драгоценные металлы), перед последующим извлечением этих компонентов. По сравнению с обратным осмосом электродиализ имеет то преимущество, что позволяет использовать термически и химически более стойкие мембраны, поэтому процесс электродиализа может осуществляться при повышенных температурах, а также при очень малых или наоборот больших значениях pH раствора. Кроме того, как уже говорилось выше, при помощи электродиализа можно получать растворы с существенно большими концентрациями, чем при помощи обратного осмоса. Недостатком электродиализа является

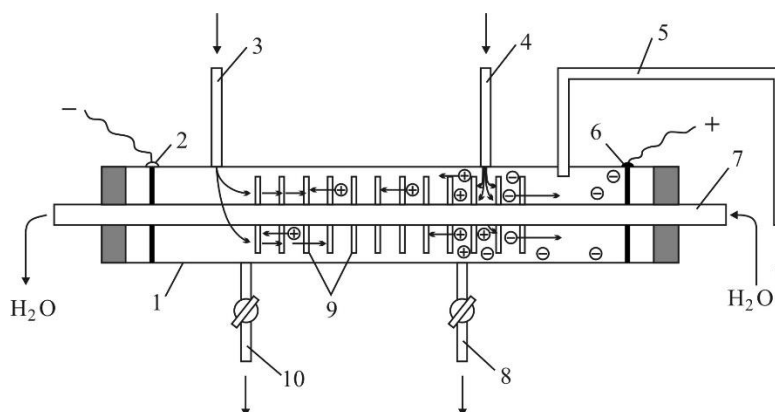
невозможность удалить незаряженные компоненты, которые также могут присутствовать в сточных водах. Так же, к отрицательным моментам можно отнести те процессы, которые появляются в процессе электродиализа, а именно: постепенное разрушение анодных мембран, вследствие выделения на аноде малых количеств хлора, брома и кислорода.

Так, например, электродиализ используется для очистки от солей растворов и водных смесей органических веществ: сывороток, вакцин, витаминов, аминокислот, молока, соков и др. Электродиализ применяется также для фракционирования веществ, например, отделения многовалентных катионов от одновалентных

## **1.2 Метод ионных подвижностей**

Возможность очищать вещества с помощью способа ионных подвижностей (ионофорез) заключается в том, что используются небольшие различия в числах переноса ионов основного компонента и ионов микропримесей в электрохимическом поле. Когда происходит сочетание вполне высокого значения градиента концентраций с противотоком раствора геля, можно заметить то, как происходит замедление движения менее подвижных ионов, и в это же время куда более подвижные ионы идут навстречу растворителю. Ионы, которые менее подвижны, будто отмывают от более подвижных. Как только уменьшается диффузия и различные конвекционные потоки, вызванная тепловым движением ионов и молекул, эффективность разделения ионов повышается.





*Рисунок 1.2 Схема устройства разделительной трубки для очистки неорганических веществ методом ионных подвижностей*

*1-разделительная трубка; 2, 6-электроды; 3-трубка для подачи растворителя, создающего гидродинамический противоток; 4-трубка для подачи исходного в случае удаления примесей катионов; 5-сифон для отвода избытка растворителя; 7-трубка водяного охлаждения; 8-вывод растворителя, очищенного от микропримесей; 9-крупнопористые мембраны из диализной бумаги; 10-вывод части растворителя, обогащенного микропримесей*

Отличие метода ионных подвижностей от электродиализного метода в том, что в установке отсутствуют полупроницаемые мембраны (диафрагмы). Мембраны, которые применяются в разделительных установках, легко пропускают как анионы, так и катионы.

Метод ионных подвижностей (ионофорез) является частным случаем электрофореза, суть которого заключается в том, что происходит перемещение диспергированных заряженных частиц в жидкой среде, которая находится в электрическом поле.

Как правило, электрофорез применяют для удаления коллоидных частиц (меди, свинца, алюминия сульфидов мышьяка, тонких механических взвесей и т.д.) из неэлектролитов.

### **1.3 Обратный осмос**

Это прохождение растворителей или воды через полупроницаемую мембрану из раствора с большей концентрацией, в раствор с меньшей концентрацией, под действием давления, которая превышает разницу осмотического давления обоих растворов.

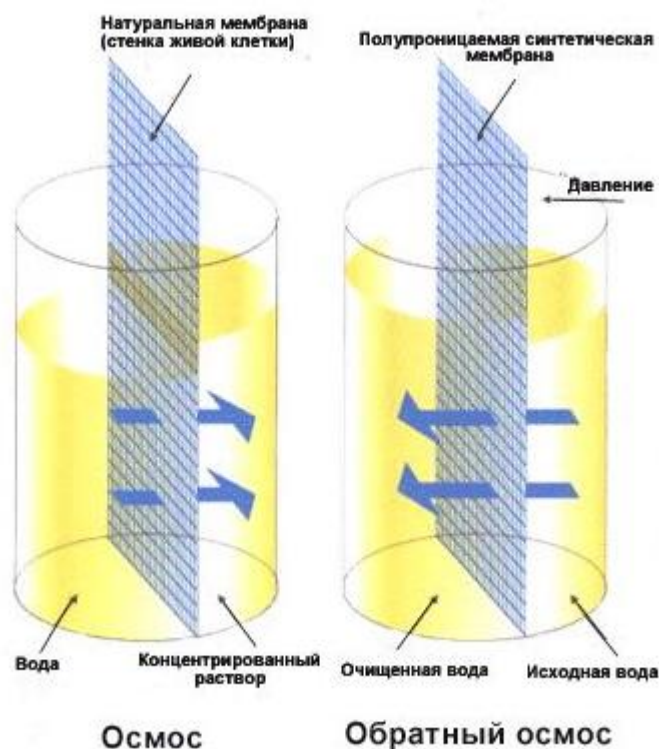
В данном случае, мембрана представляет собой преграду, которая пропускает растворитель, но не позволяет пройти веществам, которые растворились в нем. Особое строение мембраны позволяет проникать только частицам воды, для остальных же элементов, она непреодолима.

Как правило, в обратном осмосе используют полупроницаемые синтетические мембраны, которые способны задерживать загрязнители (являющиеся высоко молекулярными) и пропускать вещества, которые являются низкомолекулярными (хлор, кислород, углекислый газ и т.д.).

Данная система способна проводить очистку до 99,9%, избавляясь от таких элементов, как: железо, аммиак, нитраты, фториды, сульфаты и так далее. Делая воду избавленной от запаха.

Так же, этот метод получил широкое применение в промышленности, где происходит подготовка технологической воды, которая очищена от растворенных в ней ионов.

Принцип работы следующий, вода, под давлением проходит через мембрану, на которой, в свою очередь, оседают растворенные в воде вещества. Так как мембраны имеют пористую структуру, это позволяет свободно проникать молекулам воды, но в тоже время, диаметр пор не позволяет проникать ионам и примесям, которые содержатся в воде. Сам процесс обратного осмоса начинает происходить тогда, когда достигается определенный уровень давления, называемый осмотическим. В определенной точке, вода начинает воздействовать на мембрану с той силой, которая позволит проталкиваться молекулам через поры. Чем выше будет давление на мембрану, тем больше будет производительность и, соответственно, очистка воды.



*Рисунок 1.3 Схема Обратного осмоса*

Несмотря на то, что метод имеет большую производительность и высокую степень очистки, в нем имеется ряд проблем и недостатков.

Первым недостатком является тот факт, что отсутствует возможность очистки от летучей органики (хлора, гербициды, инсектициды), в силу того, что молекулы этих соединений гораздо меньше молекул воды и они без проблем проходят через мембрану.

Вторым фактором является то, что в очищенной воде отсутствуют минералы, в ней напрочь нет элементов, полезных для человека.

И третьим фактором является то, что на один литр очищенной воды приходится три литра загрязненной, что является очень расточительным, для потребителя.

## 1.4 Дистилляция

Под дистилляцией подразумевается, что происходит разделение жидких смесей на отличающиеся по составу фракции. Сам процесс основан на

различии температур кипения компонентов, находящихся в смеси. В свою очередь, дистилляцию можно разделить на различные способы.

**Простая дистилляция.** Здесь производится частичное испарение кипящей жидкости смеси, с помощью непрерывного отвода и последующей конденсации образовавшихся паров. В силу того, что пары над кипящей жидкостью содержат низкокипящие компоненты, которых в жидкости меньше, конденсат обогащается, а неиспарившаяся жидкость обедняется им.

**Фракционная дистилляция.** Так же, ее называют дробной перегонкой, является разновидностью простой дистилляции. Здесь ее применяют для разделения смеси жидкостей на фракции, кипение которых находится в узких интервалах температур.

**Равновесная дистилляция.** Данная дистилляция характеризуется испарением части жидкости и достаточно долгим контактом паров с неиспарившейся жидкостью, до достижения фазового равновесия.

**Дистилляция фракционная (разгонка)** характеризуется разделением жидких смесей с выделением фракций (погонов) дистиллята, кипящих в заданном интервале температур. Образующийся дистиллят отводят не в один сборник, а последовательно в 2, 3 или более сборников, в которых соответственно собирают 1-ю, 2-ю, 3-ю и последующие фракции. Наиболее богата низкокипящим компонентом 1-я фракция дистиллята.

В том случае, когда во время дистилляции происходит дефлегмация, тогда имеет место наличие обогащения паров более легкими компонентами, при частичной их конденсации.

Степень чистоты разделяемых веществ определяется количеством возвращенной в колонну флегмы. Благодаря этому можно достигнуть большей степени разделения изначальной смеси и самого обогащения дистиллята, по низкокипящим веществам, в силу того, что при дефлегмации, как правило, конденсируются более высококипящие вещества. Несмотря на это, при простой и фракционной дистилляции полное разделение веществ не может быть достигнуто. Это возможно только в том случае, если использовать

многократную дистилляцию, чередуя испарение жидкости и конденсацию паровой фазы. Дистилляция с носителем применяют для разделения термически нестойких компонентов (жирных кислот, эфирных масел и т. п.). Во избежание термического разложения (осмоления) веществ процесс дистилляции проводят при температуре ниже точки их кипения в присутствии инертного носителя (водяного пара или инертного газа).

Дистилляция с водяным паром в основном используют для разделения нерастворимых в воде веществ, а также для отгонки летучих компонентов от нелетучего остатка. Использование инертного газа позволяет вести дистилляцию при более низких температурах, но потери перегоняемого вещества больше, чем при дистилляции с водяным паром. Для дистилляции растворов при пониженной температуре используют вакуум — дистилляция., предусматривающую частичное удаление воздуха из перегонного аппарата.

Дистилляция молекулярная основана на разделении жидких смесей путем их свободного испарения в высоком вакууме  $10^{-2}$ — $10^{-6}$  Па ( $10^{-4}$ — $10^{-8}$  мм рт. ст.) при температуре ниже точки их кипения. Особенность этого способа дистилляции — взаимное расположение поверхностей переноса на расстоянии, меньшем средней длины свободного пути молекул перегоняемого вещества, что обеспечивает переход молекул из одной фазы в другую с минимальным числом соударений.

Дистилляция находит применение в химической, гидролизной, нефтеперерабатывающей и во многих отраслях пищевой промышленности. Простую дистилляцию и дистилляцию с дефлегмацией применяют, например, в ликеростроводочной промышленности, дистилляция с носителем — в эфиромасличной, молекулярную дистилляцию — в производстве витаминов и т. п. В винодельческой промышленности для получения коньячного спирта применяют простую дистилляцию многокомпонентной смеси (коньячного вино материала). Содержание летучих веществ (высших спиртов, эфиров, альдегидов, кислот и др.) в коньячном спирте регулируют фракционной дистилляцией путем последовательного разделения дистиллята на головную

(составляет 1-3% от объема спирта-сырца), среднюю (30-35%) и хвостовую (17-23%) фракций.

В общем виде, дистилляций обеспечивает получение достаточно чистой воды, при этом, этот способ является простым в использовании. Несмотря на это, дистилляция является очень медленным процессом, который так же требует длительного хранения воды и за это время, возможно, повторное загрязнение. Так же, этот способ требует большого количества энергии и воды, следовательно, является дорогим процессом при эксплуатации.

### **1.5 Ректификация**

Это процесс, при котором происходит разделение жидкой смеси на почти чистые компоненты, которые будут отличаться друг от друга температурами кипения, в результате многочисленного испарения исходной жидкости и конденсации паров. В этом и является основное отличие от процесса дистилляции, где в результате однократного цикла достигается предварительное разделение жидкой смеси.

Как правило, для осуществления ректификации используют колонные аппараты, ректификационными колоннами, в которых осуществляется многократный контакт между потоками жидкой и паровой фаз. Основой для движущей силы является разность между фактическим, то есть рабочей, и равновесной концентрациями компонентов в паровой фазе. Вся система стремится к равновесию и поэтому, пар, при контакте с жидкостью, обогащается легколетучими, низкокипящими компонентами, а жидкость труднолетучими, высококипящими компонентами. Учитывая, что система жидкость-пар находится в противотоке (пар движется вверх, а жидкость вниз), при достаточной высоте колонки, в ее верхней части можно получить почти чистый целевой компонент.

В зависимости от температуры кипения разделяемых жидкостей, ректификацию проводят при различных давлениях. Если температуре кипения 30-150 °С, используется атмосферное давление, если температуры кипения

достаточно низкие, используется давление выше атмосферного. При наличии высококипящих жидкостей, для снижения их температуры кипения, берется вакуум.

Сам процесс ректификации уже известен достаточно давно и успел зарекомендовать себя, как эффективный способ получения компонентов в чистом виде. Именно поэтому, он нашел свое широкое применение в различных технологических процессах, в подавляющей части, это спиртовая и нефтяная промышленность. Однако, основной проблемой этого метода является то, что отсутствует способность установить качественный массо- и теплоперенос в нужном месте и в необходимое время.

## 2. Практическая часть

### 2.1 Модель эффекта

Вся модель основана на предположении, что можно разделять поступательные и вращательные компоненты движения, входящие в состав поляризованного аквакомплекса.

Тот синусоидальный электрический потенциал, в котором абсолютные значения амплитуд полупериодов равны (рисунок 2.1), будут называться симметричным. Ассиметричным же будет называться потенциал, в котором абсолютные значения амплитуд полупериодов отличаются. А само электрическое поле, которое находится между заземленным и потенциальным электродом (изолированы от раствора), называются симметричным и ассиметричным, соответственно.

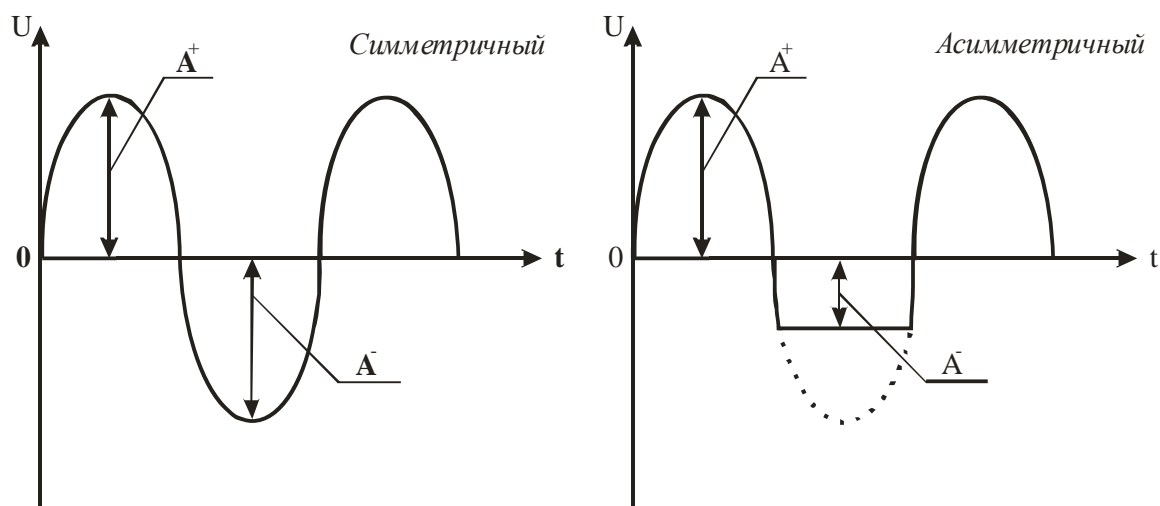


Рисунок 2.1 – Зависимость электрического потенциала от времени:  $A^+$  и  $A^-$  – амплитуды положительного и отрицательного полупериодов, соответственно

При использовании закона сохранения импульса можно обычным способом сформулировать такие понятия, как покой и скорость механической системы, как одного целого. Опираясь на то, что связь между скоростью  $\bar{v}$  и импульсом  $\bar{p}$  системы, как одного целого, будет такой же, какая могла бы быть



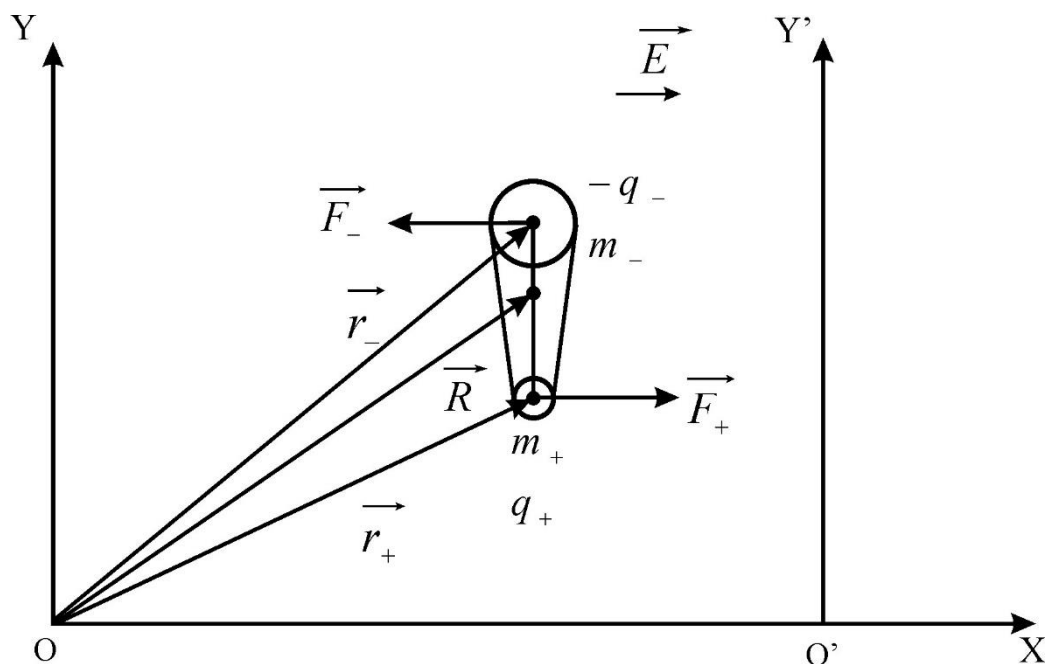
между скоростью и импульсом одной материальной точки с массой, которая равна сумме масс всех частиц в системе, можно судить об аддитивности масс.

Скорость перемещения центра инерции, как целого, есть скорость системы. Также, когда замкнутая система движется, в ней сохраняется момент импульса системы:

$$\vec{M} = \sum_i [\vec{r}_i \vec{p}_i] = const, \quad (2.1)$$

опять же, как и у импульса, он не будет зависеть от того, есть ли или нет взаимодействия между частицами.

Для того, чтобы описать с математической точки зрения модель процесса поляризованный катионный аквакомплекс «помещают» в плоскость XOY. Вектора сил, который действует на отрицательную и положительную части поляризованного аквакомплекса (диполя), будут располагаться таким образом, чтобы они находились в той же плоскости и имели ненулевую компоненту. В данном случае, они будут параллельны вектору напряженности поля, то есть оси OX и будут иметь противоположные направления (рисунок 2.2).



*Рисунок 2.2 – Поляризованный аквакомплекс в электрическом поле:  $q$  и  $m$  – абсолютные значения заряда и массы отрицательной (–) и положительной (+) частей, соответственно*

Сам же вектор напряженности электрического поля будет располагаться в плоскости  $XOY$  и иметь ненулевую компоненту  $E_x$ . Первый электрод, который будет заземлен, находится в плоскости  $YOZ$ , а второй электрод, являющийся потенциальным, находится в плоскости  $Y'O'Z'$ . Сама компонента  $E_x$ , которая является знакопеременной, будет функцией времени (рисунок 2.2).

Вся идея о том, чтобы численно описать сам процесс селективного дрейфа состоит в расщеплении, по физическим процессам изначальной нестационарной системы. Суть вычислений состоит в том, что происходит повторение шагов по времени. Расчет каждого временного шага  $2\Delta t$  разбивается на три этапа.

При рассмотрении первого этапа (первый полушаг  $\Delta t$ ) происходит рассмотрение приращения момента импульса за счет действий первого полупериода электрического поля  $\overrightarrow{\Delta M_1}$ . Проекция импульса, в которую входят положительная и отрицательная части аквакомплекса на первом этапе определяются соотношениями:

$$\begin{aligned} p_+ &= E^+ q_+ \Delta t, \\ p_- &= -E^+ q_- \Delta t. \end{aligned} \quad (2.2)$$

При рассмотрении второго этапа (следующий полушаг  $\Delta t$ ) будет рассматриваться приращение момента импульса за счет действия второго полупериода электрического поля  $\overrightarrow{\Delta M_2}$  при условии, что диполь по отношению к вектору  $\vec{E}$  будет иметь ту же ориентацию и то же положение, которое находится в плоскости  $XOY$ , что и на первом этапе. При проецировании импульсов положительной и отрицательной частей аквакомплекса на втором этапе, будет определяться соотношениями:

$$\begin{aligned} p_+ &= -E^- q_+ \Delta t, \\ p_- &= -E^- (-q_-) \Delta t = E^- q_- \Delta t. \end{aligned} \quad (2.3)$$

И на последнем, третьем этапе, будет определяться нескомпенсированная часть момента  $\vec{\Delta M} = \vec{\Delta M}_1 + \vec{\Delta M}_2$ , скорость поступательного движения  $\vec{v}$  и, следовательно, перемещение центра инерции.

На рисунке 2.3 изображен предполагаемый вид траектории изотопически отличных катионных аквакомплексов, которые находятся в ассимитричном электрическом поле, при условии, что масса положительной части аквакомплекса 2 больше, чем в аквакомплексе 1.

Дрейф катионного аквакомплекса 1 в направлении ОХ, будет происходить быстрее и раньше достигнет плоскости Y'O'Z'. В свою очередь, аквакомплекс 2 будет дрейфовать медленнее. Полный путь более тяжелого аквакомплекса 2 оказывается больше. Кроме того, образующая его траектории существенно отклоняется от первой. За плоскостью Y'O'Z' наблюдается обогащение аквакомплексами первого типа.

На самом деле, взяв во внимание хаотическое тепловое движение, которые образуют траекторию, будет изломаны, а сами направления смещения будут стохастическими и изменяться в плоскостях YOХ и YOZ. Соотношение значений смещений за счет индуцированного полем вращательно – поступательного движения и значений смещений, вызванных хаотическим движением, определяется многими параметрами. Из всех них можно выделить два параметра: температуру раствора ( $T$ ) и напряженность поля ( $E$ ). Чем больше будет отношение  $E/T$ , тем меньше будет стохастическая составляющая движения. Даже с учетом того, что будет отсутствовать тепловое движение, вид траектории может существенно отличаться от того, что представлен на рисунке 2.3 и будет определяться набором из 7 параметров:

- напряженность поля;
- частота;
- коэффициент асимметрии;
- длина связи в диполе (поляризованном аквакомплексе) ;
- соотношение масс положительной и отрицательной частей диполя;

- масса аквакомплекса, как целого;
- коэффициент поляризации аквакомплекса.

Это один из простейших случаев для свободной двухатомной молекулы в асимметричном электрическом поле с параметрами:  $E^+ = 700\text{В/м}$ ;  $E^- = 1000\text{В/м}$ ;  $\nu=500$  кГц. Коэффициент поляризации диполя в расчетах был принят равным 0,067. Из этого следует, что движение центра масс диполя будет происходить навстречу заземленному электроду. В тот момент, когда происходит смена знака напряженности поля у диполя присутствует переориентация, то есть вращение, которое будет определять характер зависимости центра масс от времени.

Из всего этого следует, что необходимо подбирать такие параметры, при которых в течении одного полупериода поля аквакомплекс «не успевал» бы совершить полный оборот относительно центра инерции. Так же, следует отметить, что при определенной комбинации параметров поля и раствора можно ожидать «исчезновения» самого эффекта дрейфа: аквакомплекс начинает вращаться относительно центра инерции при практически нулевой поступательной составляющей движения.

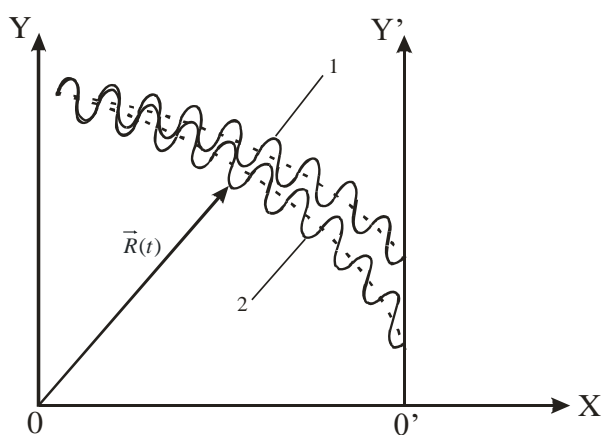


Рисунок 2.3 – Предполагаемый вид траекторий  $\vec{R}(t)$  изотопически различных аквакомплексов: рисунок иллюстрирует процесс на качественном уровне

Различие инерционных свойств катионных (анионных) аквакомплексов обусловлено различными:

- массами катионов при равенстве координационных чисел, например аквакомплексы кальция и магния  $[\text{Ca}^{40}(\text{OH}_2)_4]^{2+}$  и  $[\text{Mg}^{24}(\text{OH}_2)_4]^{2+}$

Кальций-магний – для селекции солей кальция и магния;

- координационными числами, что может быть использовано для элементного обогащения раствора или для очистки по элементной примеси.

Когда необходимо сделать математическое описание процесса возбуждения массопереноса в растворе соли, под действием периодического магнитного поля, амплитуду смещения кластера можно оценить, опираясь на следующий алгоритм:

1) определяется модуль вектора скорости кластера, соответствующей тепловому (Броуновскому) движению в растворе;

2) оценивается «деформационный» некомпенсированный заряд кластера, вызванный деформацией сольватной оболочки при столкновениях;

3) в предположении, что средний вектор скорости кластеров направлен под определенным углом (отличным от нуля) к вектору магнитной индукции (напряженности магнитного поля) определяется абсолютное значение силы Лоренца, действующей на кластер между Броуновскими столкновениями;

4) определяется частота Броуновских столкновений и, следовательно, время между столкновениями;

5) определяется импульс, приобретаемый за счет действия магнитного поля деформированным кластером между Броуновскими столкновениями, и, далее, смещение кластера относительно отрезка его траектории между столкновениями.

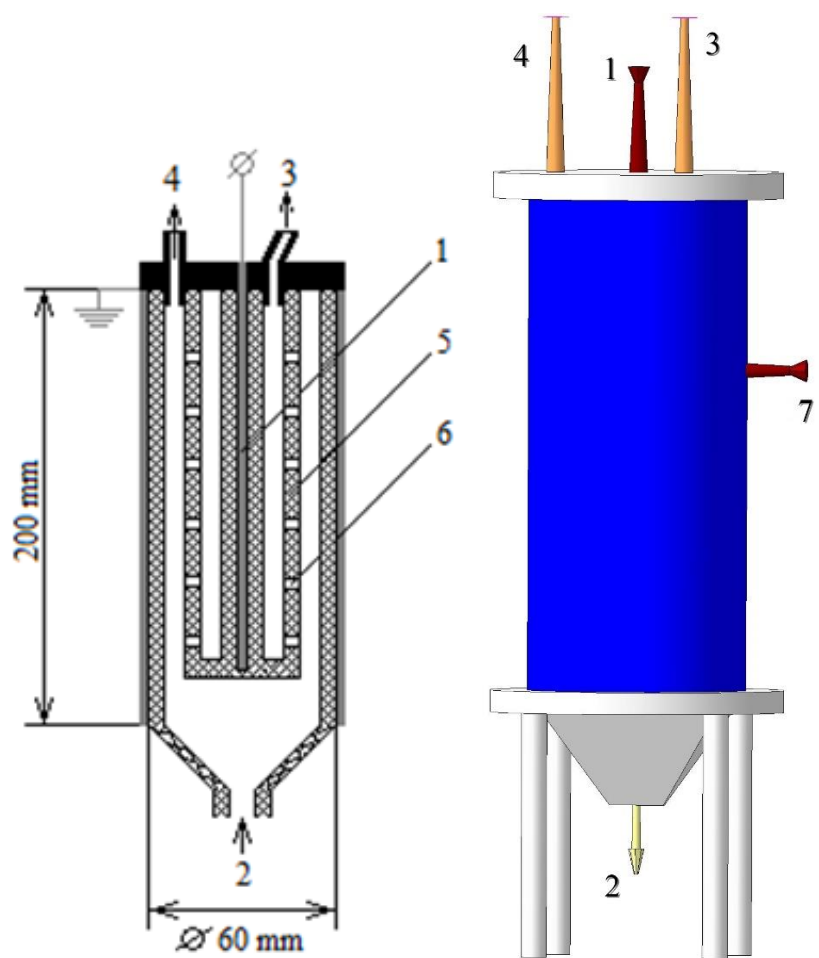
Амплитуда такого смещения в первую очередь определяется напряженностью магнитного поля и отношением частот Броуновских столкновений и переменного магнитного поля. Если амплитуда

магнитоиндуцированного смещения превосходит средний пробег кластеров в растворе, то возможен направленный массоперенос.

Учитывая, что кластеры образованы как анионами, так и катионами, то некомпенсированный заряд, который вызывается деформацией сольватной оболочки может быть, как отрицательным, так и положительным.

## **2.2 Описание установки**

В центре расположен заземленный электрод 1 из стального прутка, герметично изолированный от рабочего раствора поливинилхлоридной трубкой. Потенциальный стальной электрод 7 цилиндрической формы изолирован герметично от рабочего раствора полиэтиленовой плёнкой. Весь объём рабочего раствора, подаваемого в нижнюю часть установки, разделён полиэтиленовым перфорированным цилиндром 5 на внутреннюю и наружную зоны. Этот цилиндр выполняет функцию разделителя между зонами обогащения и обеднения раствора целевыми ионами.



*Рис. 2.4.. Схематическое изображение во фронтальном разрезе и 3D изображение опытной установки*

*1- Заземленный электрод;; 2-Штуцер подачи раствора; 3-Штуцер подачи раствора с внутреннего слоя; 4- Штуцер подачи раствора с внешнего слоя; 5-Перфорированный цилиндр;6-Отверстия в перфорированном цилиндре;7- Потенциальный электрод*

Перфорация цилиндра 5 выполнена в виде продолговатых вертикальных отверстий, расположенных азимутально симметрично вдоль образующих цилиндра по всей его поверхности. Отверстия позволяют перемещаться ионным компонентам рабочего раствора из одной зоны в другую. Подаваемый через штуцер 2 в нижнюю часть установки исследуемый раствор двигался вверх по обеим зонам с одинаковой линейной скоростью. Выход раствора в верхней части установки из каждой зоны осуществлялся автономно через штуцеры 3 и 4 и отводные шланги, снабжённые специальными винтовыми зажимами. С помощью этих зажимов производилось регулирование выходных объёмов раствора во внутренней и наружной зонах. При этом скорость

движения раствора во внутренней зоне на 4-7% превышала скорость движения раствора в наружной зоне. Во всех опытах характер движения растворов соответствовал ламинарному режиму течения жидкости, а линейная скорость раствора составляла не более 4см/мин.

### **2.3 Описание Эксперимента**

Обнаруженное ранее явление селективного дрейфа сольватированных ионов под действием внешнего «асимметричного» электрического поля на сегодня нашло только одно практическое приложение в технологии разделения катионов церия и иттрия [1], образующихся при исследовании свойств отработанного ядерного топлива. При этом направления, в которых использование явления может принести значимый эффект, достаточно четко обозначены в ряде работ. Основной причиной небольшого количества практических использований обнаруженного явления стали два фактора: неглубокая проработка вопроса аппаратурного исполнения технических систем, функционирующих на основе явления, и недостаток экспериментальной информации о влиянии частот электрического поля на эффективность процессов разделения сольватированных ионов в движущихся (циркулирующих) растворах.

В настоящей работе представлены результаты, которые еще раз подтверждают значимость обнаруженного явления, его устойчивость и воспроизводимость, а также позволяют создать относительно простую экспериментальную установку для поиска приложений явления селективного дрейфа сольватированных ионов под действием внешнего «асимметричного» электрического поля. Термин “асимметричное” электрическое поле был введен в экспериментах по возбуждению селективного дрейфа ионов и имеет важную смысловую нагрузку, поскольку «обычный» синусоидальный потенциал не вызывает обнаруженного явления.

Блок-схема экспериментального комплекса представлена на рисунке 2.5. Основным источником питания сигнала переменной частоты служил



генератор звуковых сигналов ГЗ-109 1, сигнал от которого поступал на вход предварительного усилителя RUB2250 2 с собственным источником питания NES-100-12 3.

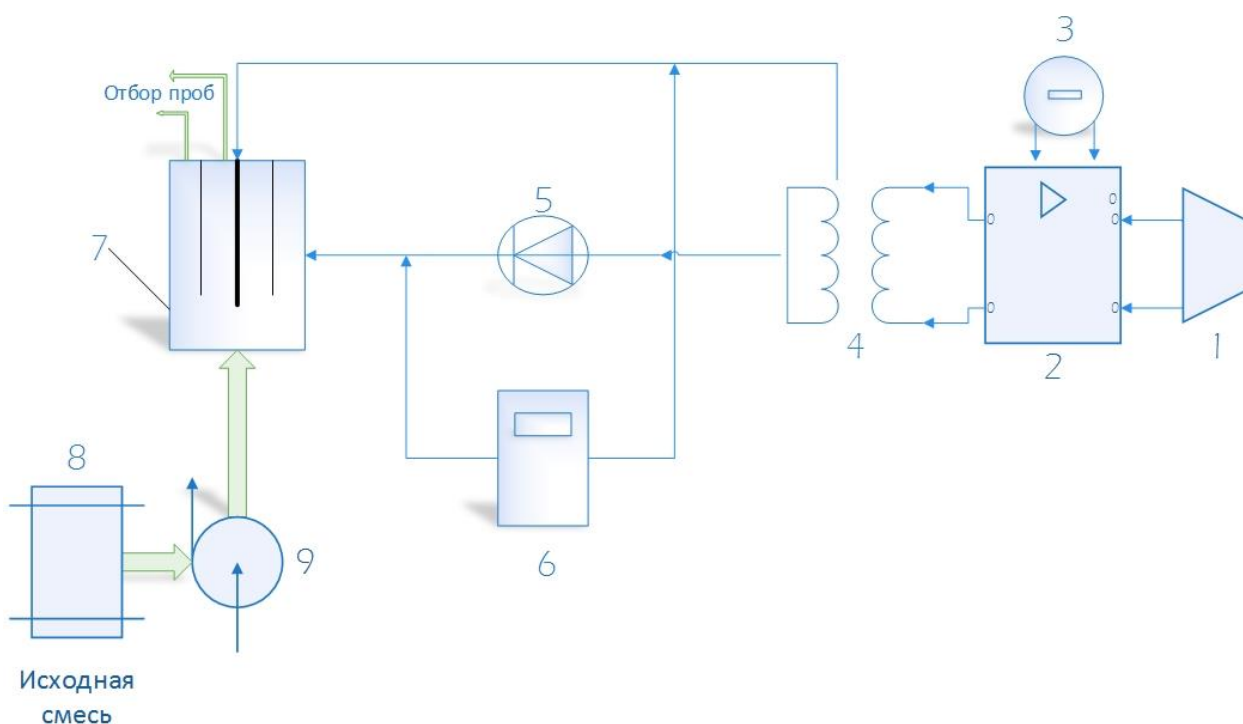


Рис. 2.5 Блок-схема экспериментального комплекса

Затем усиленный трансформатором 4 потенциал через устройство формирования сигнала асимметричной формы 5 подавался на центральный электрод 7 опытного устройства. При этом второй электрод заземлялся. С помощью осциллографа Hantek DSO 1162S 6 происходил контроль параметров и формы исходного сигнала. В процессе опытов рабочий раствор из ёмкости с исходной смесью подавался перистальтическим насосом 9 в нижнюю часть опытного устройства. В опытах использовались разбавленные смеси растворов хлоридов кальция и магния марки «х.ч.». Общий вид опытного устройства, представляющего собой цилиндр, внутри которого коаксиально расположены основные конструктивные элементы, показан на рисунке 2.4.



*Рисунок 2.6 Фотография экспериментального комплекса*

В течение опытов через определённые промежутки времени брались пробы растворов, вытекающих как из внутренней, так и из наружной зон обрабатываемого раствора. Анализ проб на содержание ионов магния и кальция проводился на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивной связанной плазмой iCAP 6300 Duo.

Результаты статистической обработки (в пакете «Statistica», версии 8.0) экспериментальных данных показали, что ошибка измерений во всех опытах не превышала в относительных долях 0,014 от средних значений. Следует отметить, что с помощью устройства 5 (рисунок 2.5) формировалась положительная полуволна исходного синусоидального сигнала и объёмы растворов внутренней и наружной зон подвергались воздействию только положительного потенциального поля синусоидальной формы. Это обеспечивало скачкообразное перемещение положительно заряженных сольватированных катионов к электроду с нулевым зарядом 5 от потенциального положительно заряженного электрода 7 (рисунок 2.4).

Основная задача заключалась в том, чтобы в определённом диапазоне частот обнаружить изменение концентраций катионов магния и кальция в растворах внутренней и наружной зон. Такой факт свидетельствовал бы о

селективном переносе одного типа катионов из наружной зоны во внутреннюю. С тем, чтобы обеспечить вынужденный переход катионов из наружной зоны во внутреннюю, линейная скорость перемещения раствора в ней должна быть несколько выше. Подобный режим движения раствора устанавливался с помощью зажимов в каждом из опытов. Ранее было показано, что эффекты изменения концентраций ионов в разбавленных растворах при наложении на них асимметричных электрических полей наблюдались в диапазоне частот в сотни герц. Учитывая это обстоятельство, в данной работе исследования проводились в диапазоне частот от 10 до 1500 Гц.

## **2.4 Результаты анализа эксперимента**

На рисунке 2.7 показан характер изменения концентрации ионов кальция во внутренней (кривая 1) и наружной (кривая 2) зонах в диапазоне частот от 20 до 180 Гц. Ранее теоретически было показано, что возбуждение явления следует ожидать при частотах в десятки Герц, когда в растворе формируется самосогласованное поле, а размер сольватированного иона-кластера, образованного ионом и молекулами растворителя, образующего сольватную оболочку, обратно пропорционален квадратному корню из значения концентрации соли в растворителе. Значения частот, в свою очередь, обратно пропорциональны значению момента инерции кластера.

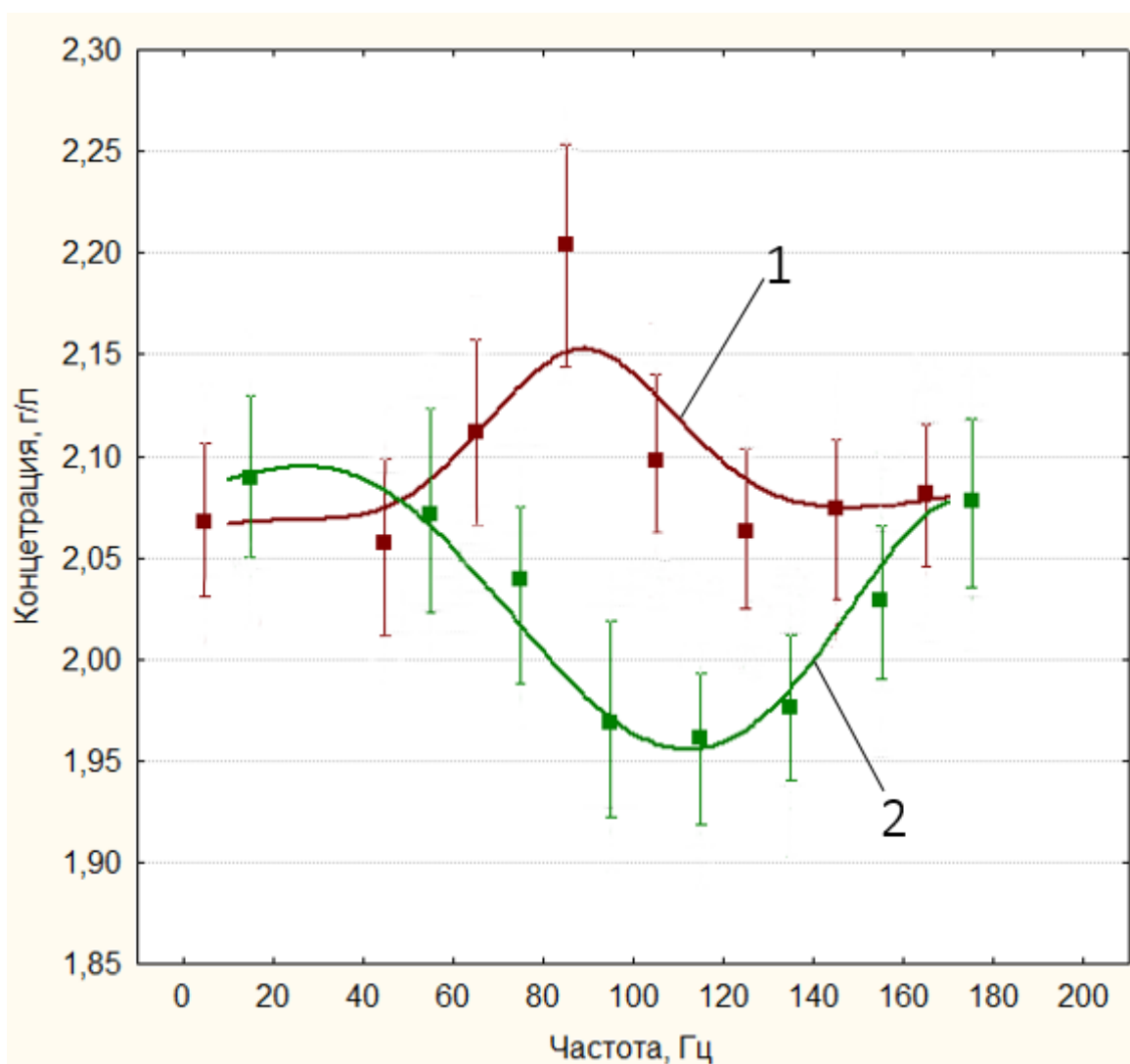


Рисунок 2.7 Влияние частоты на содержание ионов кальция во внутренней (кривая 1) и наружной (кривая 2) зонах разделения при напряжении 285 В (напряженность поля в ячейке 86,4 В/см) и исходной концентрации 2,065 г/л.

Как видно, в интервале 80-120 Гц наблюдается заметное увеличение содержания ионов кальция во внутренней зоне рабочего раствора с отчётливо выраженным максимумом. Важно отметить и соответствующее уменьшение их концентрации в наружной зоне, то есть имеет место перераспределение концентрации одного из ионных компонентов между зонами рабочего раствора, что по сути своей означает процесс их разделения. Вероятно, что в данном диапазоне частот имеет место деформационные сдвиги в структурах сольватных оболочек ионов кальция, а, возможно, и частичное разрушение внешних слоёв сольватации, где энергия связи молекул сольватной воды с центральным ионом имеет минимальное значение в сравнении с молекулами воды, составляющими первичные сольватные оболочки. Такое обстоятельство

вызывает возникновение условий направленного переноса десольватированных ионов в потенциальном поле, что в соответствии с принятой ранее терминологией определяет эффект их селективного электроиндуцированного дрейфа. Поскольку всякий раствор электролита обладает свойством электронейтральности, то любое изменение в локальном объёме его электрического заряда - положительного или отрицательного – должно приводить к мгновенной компенсации этого заряда путём перемещения в этот объём ионов соответствующего сорта. Так, если в нашем случае происходит перенос ионов кальция из наружной зоны разделения во внутреннюю, создавая в последней избыточное содержание ионов положительного заряда, то в эквивалентном количестве из внутренней зоны в наружную должен осуществляться перенос ионов магния. Данное явление можно интерпретировать и как процесс электромиграционного переноса, и как обменный процесс между ионами разного сорта. Таким образом, во внутренней зоне должно иметь место уменьшение содержания ионов магния, а в наружной зоне, наоборот, увеличение концентрации этих ионов. Действительно, если обратиться к рисунку 2.8, то становится очевидным, что изменение концентрации ионов магния по отношению к содержанию ионов кальция во внутренней и наружной зонах разделения в указанном частотном диапазоне носит явно выраженный обратный характер.

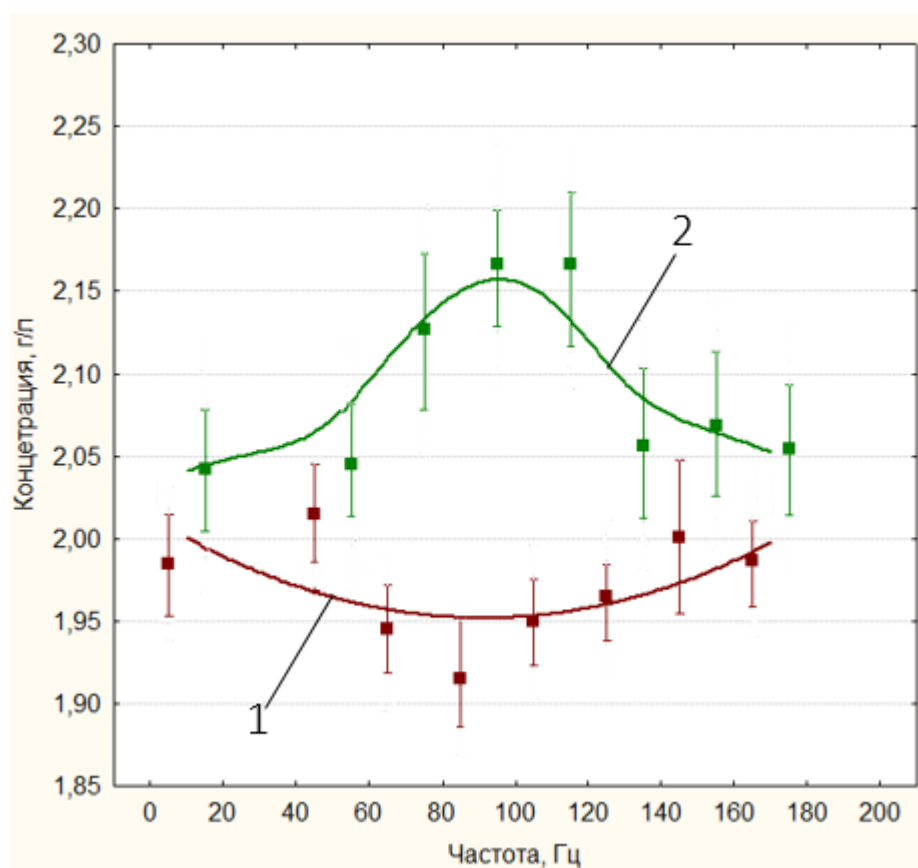


Рисунок 2.8 Изменение концентрации ионов магния во внутренней (кривая 1) и наружной (кривая 2) зонах разделения при напряжении 285 В (напряженность поля в ячейке 86,4 В/см) и исходном содержании 1,986 г/л.

По своему виду частотная зависимость содержания ионов кальция имеет резонансный характер, то есть концентрационные экстремумы для этих ионов определены в достаточно узком интервале частот. То же самое можно сказать и о частотной зависимости содержания ионов магния (рисунок 2.9). Однако, экстремальные значения концентраций ионов магния в зонах разделения наблюдаются в области более высоких частот, то есть при энергии внешнего поля, превышающей пороговые значения резонансных явлений для тех же ионов кальция. Это обусловлено, по-видимому, различием в длине связи сольватной оболочки с центральным ионом. Радиус внешней электронной оболочки у иона магния меньше, чем у иона кальция, поэтому кулоновское взаимодействие иона магния с молекулами воды, входящими в состав сольватных оболочек, образует более короткую связь, что соответствует большей собственной частоте связи. Катионы оказывают лишь координирующее влияние на молекулы растворителя в первой и второй сольватных сферах, а количество молекул растворителя в сольватной оболочке

определяется радиусом экранирования заряда катиона совокупным зарядом поляризованных молекул растворителя.

Теоретически было показано, что направленный дрейф сольватированных ионов возбуждается также на частотах, соответствующих различным составляющим вращательно-поступательного движения системы «ион – сольватная оболочка», и на частотах, соответствующих переходу колебательных движений во вращательные. При этом значения частот составляют единицы КГц. Резонанса можно ожидать

- на частоте кооперативного вращательного движения молекул  $H_2O$ , объединенных в сольватную оболочку относительно оси, проходящей на расстоянии, равном внешнему радиусу сольватной оболочки от центра тяжести;
- на частоте кооперативного вращательного движения молекул  $H_2O$ , объединенных в сольватную оболочку, относительно центра тяжести сольватированного иона-кластера;
- на частоте вращательного движения кластера как целого;
- на частоте перехода колебательного движения во вращательное.

Необходимо было посчитать коэффициент разделения, который характеризует величину эффекта разделения в обогащенной и обедненной фракции по отношению к концентрации в потоке питания. Для этого необходимо было посчитать коэффициенты распределения  $P_{Ca}$ ,  $P_{Mg}$ , по кальцию и магнию, соответственно. Сам же коэффициент  $K_{разд}$  рассчитывается, как отношение коэффициентов распределения и равен 1,21.

$$P_{Ca} = \frac{C_{Ca}^{вн}}{C_{Ca}^{нар}} (2.5)$$

$$P_{Mg} = \frac{C_{Mg}^{вн}}{C_{Mg}^{нар}} (2.6)$$

$$K_{разд} = \frac{P_{Ca}}{P_{Mg}} = \frac{C_{Ca}^{вн}}{C_{Ca}^{нар}} * \frac{C_{Mg}^{нар}}{C_{Mg}^{вн}} = 1.21 (2.7)$$

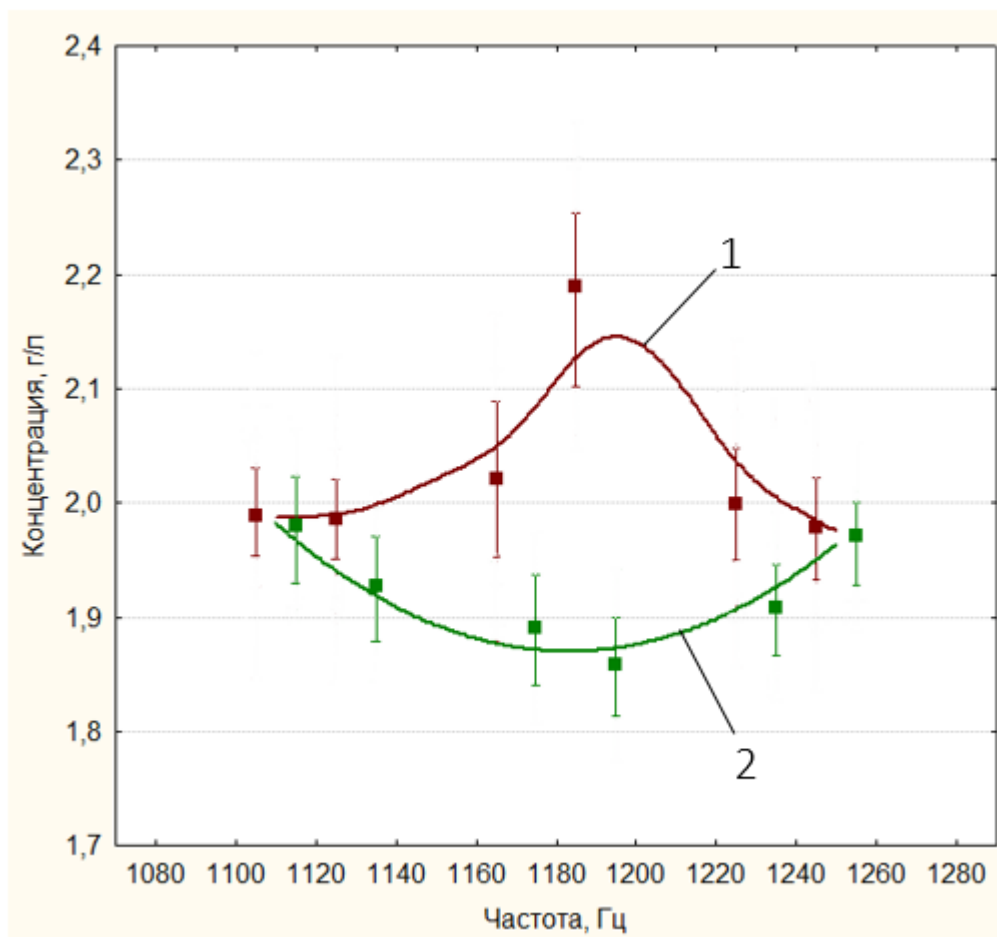


Рис. 2.9 Частотная зависимость содержания ионов магния во внутренней (кривая 1) и наружной (кривая 2) зонах разделения при напряжении 285 В (напряженность поля в ячейке 86,4 В/см) и исходной концентрации 1,931 г/л.

Следовательно, для резонансной деформации сольватных оболочек ионов магния потребуется более высокое значение энергии внешнего электрического поля, которое будет возрастать с увеличением частоты колебаний. Теоретические представления об электроиндуцированном дрейфе сольватированных ионов указывают на то, что одним из факторов, вызывающих данное явление, является значение амплитуды электрического потенциала, определяющего напряжённость электрического поля. Опыты, проведённые при значениях напряжения 40 В (напряженность поля в ячейке 12,1 В/см), показали, что в пределах ошибки измерений концентрации ионов магния и кальция не изменялись и оставались на уровне своих исходных значений. Поскольку потенциал является основной энергетической характеристикой электрического поля, то существует, по-видимому, некоторое пороговое значение напряженности электрического поля, определяющего тот



энергетический минимум, который в определённом диапазоне частот вызывает эффект деформации сольватных оболочек ионов и, соответственно, их селективный электроиндуцированный дрейф. В рассматриваемом случае пороговое значение напряжённости электрического поля лежит в интервале от 12 до 100 В/см. Применительно к исследованному способу разделения результаты измерений определены общие коэффициенты разделения конкурирующих катионов кальция и магния. Чтобы говорить об однократном коэффициенте разделения необходима полная информация о всех возможных механизмах селективного массопереноса. Предположительно, превалирующим является процесс электроиндуцированного дрейфа на границе раздела наружной и внутренней зон, приводящий к обмену разнотипными ионами между этими зонами. Дополнительной движущей силой, обеспечивающей, наряду с электромиграционным переносом, перемещение ионов из наружной зоны во внутреннюю, может служить избыток гидродинамического давления, который возникает за счёт разности скоростей движения растворов во внутренней и наружной зонах. В этой связи вопрос о том, как влияет соотношение скоростей движения растворов в зонах на эффект разделения, требует отдельного рассмотрения. Одновременный массоперенос некоторой доли конкурирующих ионов в течение определённого промежутка времени через границу наружной и внутренней зон на всей площади их соприкосновения можно, по-видимому, интерпретировать как однократный коэффициент разделения.

## Выводы

1. Выполненные эксперименты доказывают возможность использования ранее обнаруженного явления электроиндуцированного селективного дрейфа сольватированных ионов в растворах солей под действием асимметричного электрического поля для организации технологического процесса обогащения растворов по целевому металлу.
2. Обнаружено, что возбуждение эффекта селективного электроиндуцированного дрейфа сольватированных ионов может наблюдаться как минимум в двух интервалах частот. В пределах каждого из интервалов находятся частоты, соответствующие собственным частотам колебаний системы “ион – сольватная оболочка” как сферического ротатора (вращение сольватной оболочки относительно центрального иона) или как системы жестко связанных центрального иона и поллой оболочки.
3. Изучена частотная зависимость содержания ионов кальция и магния в смеси их хлоридных растворов и показано, что для каждого из конкурирующих ионов существует определённый диапазон частот, в котором скорость направленного дрейфа одного из них значительно возрастает.
4. Показано, что эффект разделения ионов существенно зависит от величины подаваемого потенциала – основной характеристики внешнего электрического поля.

## **Заключение**

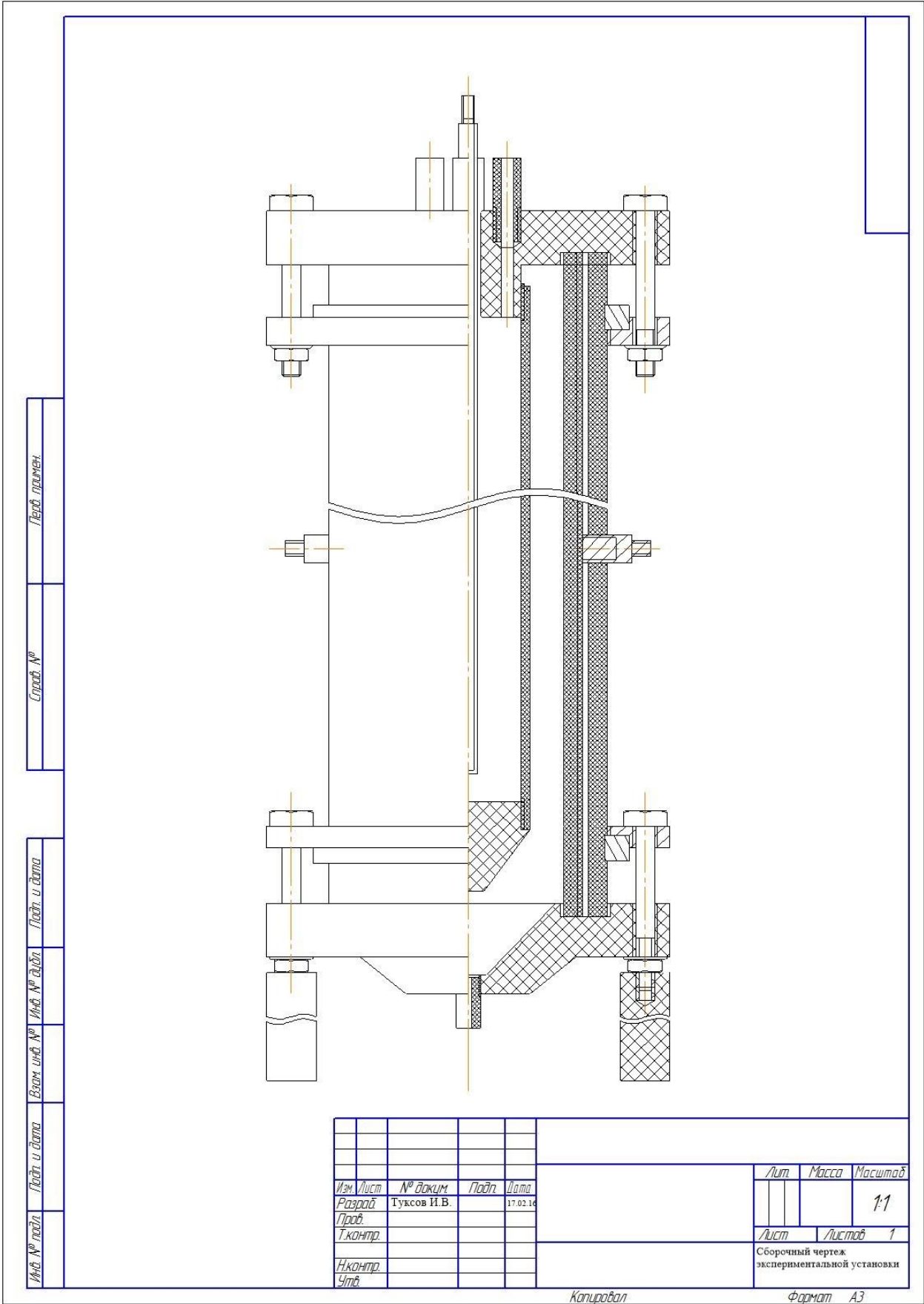
В ходе проведенной работы была собрана экспериментальная установка, с помощью которой проводились опыты, по истечению которых, были получены результаты, благодаря которым можно судить о наличии явления селективного дрейфа ионов. Так же, была проведена статистическая обработка результатов эксперимента, с помощью пакета «Statistica», приведена в таблицах Б.1-Б.4 (Приложения Б). Был определен коэффициент разделения, который достигает своего максимального значения, при частоте сигнала в 1200 Гц и напряжению 60 В, равен 1,49.

## Список Литературы

1. Казарян М.А., Ломов И.В., Шаманин И.В. Электрофизика структурированных растворов солей в жидких полярных диэлектриках. - М.:Физматлит, 2011. – 190с.
2. Способ разделения ионов металлов. Патент РФ № 2428759 (2011) / Гаврилов П.М., Гусев А.Л., Трутнев Ю.А., Казарян М.А., Шаманин И.В. и др.
3. Kazaryan M.A., Shamanin I.V., Mel'nik N.N., Lomov I.V., Dolgoplov S.Yu The Structure and Radiophysical Properties of Solutions of Salts in Liquid Polar Dielectrics // Russian Journal of Physical Chemistry B, 2009, Vol. 3, No. 1, p.p. 40-45
4. Shamanin I.V., Kazaryan M. A. Clusters Formation in Salts Solution in Polar Dielectric Liquids and Electrically-induced Separation of Solvated Ions // British Journal of Applied Science and Technology. - 2014 - Vol. 4 - №. 18, p.p. 2538-2550
5. Shamanin I.V., Kazaryan M. A., Sidko D. F. Cluster Structure of Salt Solutions in Polar Dielectric Liquids // Advanced Materials Research. - 2015 - Vol. 1084, p.p. 97-107
6. Пуховский Ю.П., Сахаров Д.В., Сафонова Л.П. Исследование структуры сольватных оболочек ионов  $\text{Na}^+$  и  $\text{K}^+$  в N,N-диметилформамиде при различной температуре методом молекулярно-динамического моделирования //Журнал структурной химии, Том 43, № 2, 2002, с. 307-316
7. Burgess J. Metal ions in solutions. – Ellis Horwood: Chichester, UK., 1978. – 481 p.
8. Ломов И.В. Эффект электроиндуцированного селективного дрейфа катионных аквакомплексов в водных растворах солей щелочно- и редкоземельных металлов [Электронный ресурс], URL: <http://search.rsl.ru/ru/record/01003280979>
9. Обратный осмос и принцип работы обратноосмотической мембраны [Электронный ресурс], URL: <http://aqua-mart.com.ua/txt.php?category=ca6e0&id=78>
10. Дистилляция [Электронный ресурс], URL: <http://dic.academic.ru/dic.nsf/bse/84835>
11. Ректификация [Электронный ресурс], URL: <http://www.xumuk.ru/encyklopedia/2/3870.html>
12. Анализ современной промышленной ректификации и ректификационная технология Линас [Электронный ресурс], URL: <http://www.linass.ru/intro.htm>
13. Электродиализ [Электронный ресурс], URL: [http://www.mediana-filter.ru/kh6\\_11.html](http://www.mediana-filter.ru/kh6_11.html)
14. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: учебно-методическое пособие / И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.А. Гаврикова, Н.В. Шаповалова, Л.Р. Тухватулина З.В. Криницына; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 36 с.
15. Федеральный закон от 24.07.2009 №212-ФЗ «О страховых взносах в Пенсионный фонд Российской Федерации, Фонд социального страхования Российской Федерации, Федеральный фонд обязательного медицинского страхования»
16. Федеральный закон «Об основах охраны труда» от 17.07.1999 г. № 181-ФЗ.
17. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). СП 2.6.1.2523-09.
18. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к ПЭВМ и организации работы».
19. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность..
20. Пожаро- и взрывобезопасность промышленных объектов. ГОСТ Р12.1.004-85 ССБТ Пожарная безопасность.

Приложение А

Приложение А.1 – Сборочный чертеж экспериментальной установки



## Приложение Б

### Приложение Б.1-Статистическая обработка полученных результатов эксперимента, при частотах от 1170 до 1260 Гц

Потенциал 60В										
Частота	Состояние	Кол-во измерений	Среднее	Дов. Интервал - 95%	Дов. Интервал +95%	Медиана	Минимум	Максимум	Дисперсия	Среднее квадратичное отклонение
1200	Загн В.Р.	4	2,431250	2,100530	2,761970	2,423500	2,193000	2,685000	0,207840	0,103920
	Мгн В.Р.	4	2,144250	1,847700	2,440800	2,132500	1,936000	2,376000	0,186366	0,093183
	Загн Н.Р.	4	2,329000	2,180234	2,477766	2,362000	2,193000	2,399000	0,093492	0,046746
	Мгн Н.Р.	4	2,036250	1,914480	2,158020	2,048000	1,936000	2,113000	0,076526	0,038263
1170	Загн В.Р.	4	2,506750	2,404627	2,608873	2,500000	2,436000	2,591000	0,064179	0,032089
	Мгн В.Р.	4	2,033750	1,943135	2,124365	2,020000	1,982000	2,113000	0,056947	0,028473
	Загн Н.Р.	4	2,525250	2,460050	2,590450	2,517000	2,491000	2,576000	0,040975	0,020487
	Мгн Н.Р.	4	2,039750	1,988659	2,090841	2,036500	2,006000	2,080000	0,032108	0,016054
1230	Загн В.Р.	4	2,491250	2,390743	2,591757	2,480500	2,433000	2,571000	0,063163	0,031582
	Мгн В.Р.	4	2,007500	1,929541	2,085459	1,997000	1,966000	2,070000	0,048993	0,024497
	Загн Н.Р.	4	2,507500	2,382244	2,632756	2,497000	2,433000	2,603000	0,078717	0,039358
	Мгн Н.Р.	4	2,017500	1,928292	2,106708	2,018500	1,966000	2,067000	0,056062	0,028031
1260	Загн В.Р.	4	2,374250	2,283672	2,464828	2,391000	2,292000	2,423000	0,056923	0,028462
	Мгн В.Р.	4	1,936250	1,858618	2,013882	1,955500	1,864000	1,970000	0,048788	0,024394
	Загн Н.Р.	4	2,390250	2,295670	2,484830	2,409500	2,307000	2,435000	0,059438	0,029719
	Мгн Н.Р.	4	1,941250	1,825426	2,057074	1,965500	1,836000	1,998000	0,072789	0,036395

Приложение Б.2- Статистическая обработка полученных результатов эксперимента, при частотах от 80 до 140 Гц и напряжении 123В

Потенциал 123В										
Частота	Вещество	кол-во измерений	Среднее	Дов. Интервал - 95%	Дов. Интервал +95%	Медиана	Минимум	Максимум	Дисперсия	Среднее квадратичное отклонение
80	Ca) г\л В.Р.	4	1,555000	1,468574	1,641426	1,535000	1,515000	1,635000	0,002950	0,054314
	Mg) г\л В.Р.	4	1,990000	1,886673	2,093327	1,987500	1,915000	2,070000	0,004217	0,064936
	Ca) г\л Н.Р.	4	1,563750	1,521965	1,605535	1,557500	1,540000	1,600000	0,000690	0,026260
	Mg) г\л Н.Р.	4	2,008750	1,941750	2,075750	2,007500	1,970000	2,050000	0,001773	0,042106
100	Ca) г\л В.Р.	4	1,485000	1,423031	1,546969	1,482500	1,440000	1,535000	0,001517	0,038944
	Mg) г\л В.Р.	4	1,868750	1,790695	1,946805	1,867500	1,810000	1,930000	0,002406	0,049054
	Ca) г\л Н.Р.	4	1,478750	1,414319	1,543181	1,475000	1,440000	1,525000	0,001640	0,040492
	Mg) г\л Н.Р.	4	1,850000	1,780337	1,919663	1,847500	1,810000	1,895000	0,001917	0,043780
120	Ca) г\л В.Р.	4	1,468750	1,434761	1,502739	1,460000	1,455000	1,500000	0,000456	0,021360
	Mg) г\л В.Р.	4	1,853750	1,811965	1,895535	1,847500	1,830000	1,890000	0,000690	0,026260
	Ca) г\л Н.Р.	4	1,463750	1,429761	1,497739	1,462500	1,440000	1,490000	0,000456	0,021360
	Mg) г\л Н.Р.	4	1,846250	1,806536	1,885964	1,847500	1,820000	1,870000	0,000623	0,024958
140	Ca) г\л В.Р.	4	1,457500	1,385601	1,529399	1,462500	1,405000	1,500000	0,002042	0,045185
	Mg) г\л В.Р.	4	1,850000	1,767063	1,932937	1,852500	1,790000	1,905000	0,002717	0,052122
	Ca) г\л Н.Р.	4	1,491250	1,298941	1,683559	1,477500	1,360000	1,650000	0,014606	0,120856
	Mg) г\л Н.Р.	4	1,893750	1,669998	2,117502	1,882500	1,735000	2,075000	0,019773	0,140616

Приложение Б.3- Статистическая обработка полученных результатов эксперимента, при частотах от 80 до 140 Гц и напряжении 80В

Потенциал 80В										
Частота	Вещество	кол-во измерений	Среднее	Ниж. Интервал - 95%	Верх. Интервал +95%	Медиана	Минимум	Максимум	Дисперсия	Среднее квадратичное отклонение
80	Ca) г\л В.Р.	4	1,627500	1,563028	1,691972	1,632500	1,575000	1,670000	0,001642	0,040517
	Mg) г\л В.Р.	4	1,797500	1,717279	1,877721	1,812500	1,725000	1,840000	0,002542	0,050415
	Ca) г\л Н.Р.	4	1,636250	1,592012	1,680488	1,635000	1,605000	1,670000	0,000773	0,027801
	Mg) г\л Н.Р.	4	1,780000	1,679572	1,880428	1,765000	1,725000	1,865000	0,003983	0,063114
100	Ca) г\л В.Р.	4	1,612500	1,602229	1,622771	1,612500	1,605000	1,620000	0,000042	0,006455
	Mg) г\л В.Р.	4	1,867500	1,853720	1,881280	1,865000	1,860000	1,880000	0,000075	0,008660
	Ca) г\л Н.Р.	4	1,612500	1,583087	1,641913	1,620000	1,585000	1,625000	0,000342	0,018484
	Mg) г\л Н.Р.	4	1,876250	1,852492	1,900008	1,880000	1,855000	1,890000	0,000223	0,014930
120	Ca) г\л В.Р.	4	1,802500	1,235677	2,369323	1,640000	1,595000	2,335000	0,126892	0,356219
	Mg) г\л В.Р.	4	2,073750	1,429407	2,718093	1,885000	1,845000	2,680000	0,163973	0,404936
	Ca) г\л Н.Р.	4	1,642500	1,542388	1,742612	1,635000	1,585000	1,715000	0,003958	0,062915
	Mg) г\л Н.Р.	4	1,892500	1,788258	1,996742	1,880000	1,835000	1,975000	0,004292	0,065511
140	Ca) г\л В.Р.	3	1,770000	1,275039	2,264961	1,660000	1,650000	2,000000	0,039700	0,199249
	Mg) г\л В.Р.	3	2,001667	1,463071	2,540263	1,905000	1,850000	2,250000	0,047008	0,216814
	Ca) г\л Н.Р.	3	1,818333	1,423533	2,213134	1,750000	1,705000	2,000000	0,025258	0,158929
	Mg) г\л Н.Р.	3	2,066667	1,667397	2,465936	2,000000	1,950000	2,250000	0,025833	0,160728



Приложение Б.4- Статистическая обработка полученных результатов эксперимента, при частотах от 80 до 140 Гц и напряжении 40В

Потенциал 40В										
Частота	Состояние	кол-во измерений	Среднее	Дов. Интервал - 95%	Дов. Интервал +95%	Медиана	Минимум	Максимум	Дисперсия	Среднее квадратичное отклонение
80	Ca) г\л В.Р.	4	2,202500	2,153567	2,251433	2,208500	2,162000	2,231000	0,000946	0,030752
	Mg) г\л В.Р.	4	1,762750	1,687592	1,837908	1,760000	1,708000	1,823000	0,002231	0,047233
	Ca) г\л Н.Р.	4	2,156500	2,113714	2,199286	2,167500	2,117000	2,174000	0,000723	0,026889
	Mg) г\л Н.Р.	4	1,729750	1,697286	1,762214	1,730500	1,708000	1,750000	0,000416	0,020402
100	Ca) г\л В.Р.	4	2,246250	2,146816	2,345684	2,250500	2,175000	2,309000	0,003905	0,062489
	Mg) г\л В.Р.	4	1,815750	1,735614	1,895886	1,814500	1,764000	1,870000	0,002536	0,050361
	Ca) г\л Н.Р.	4	2,235500	2,136107	2,334893	2,214500	2,186000	2,327000	0,003902	0,062463
	Mg) г\л Н.Р.	4	1,810250	1,722119	1,898381	1,793000	1,765000	1,890000	0,003068	0,055386
120	Ca) г\л В.Р.	4	2,264500	2,198796	2,330204	2,264000	2,219000	2,311000	0,001705	0,041292
	Mg) г\л В.Р.	4	1,825750	1,775024	1,876476	1,830500	1,784000	1,858000	0,001016	0,031879
	Ca) г\л Н.Р.	4	2,271250	2,208909	2,333591	2,276000	2,219000	2,314000	0,001535	0,039178
	Mg) г\л Н.Р.	4	1,820000	1,776695	1,863305	1,826500	1,784000	1,843000	0,000741	0,027215
140	Ca) г\л В.Р.	4	2,286750	2,242531	2,330969	2,288000	2,255000	2,316000	0,000772	0,027789
	Mg) г\л В.Р.	4	1,839500	1,802284	1,876716	1,839000	1,812000	1,868000	0,000547	0,023388
	Ca) г\л Н.Р.	4	2,318250	2,193637	2,442863	2,297000	2,255000	2,424000	0,006133	0,078313
	Mg) г\л Н.Р.	4	1,873750	1,782181	1,965319	1,853000	1,833000	1,956000	0,003312	0,057546

